# AN50006

## 功率MOSFET的线性模式工作

版本2.0 — 2022年4月12日 应用笔记

文档信息

| 信息 | 内容 |
| --- | --- |
| 关键字 | 线性模式、饱和、MOSFET、SOA、温度不稳定性、Spirito效应、LDO、有源钳位、安全气囊、软启动、热插拔 |
| 摘要 | 了解MOSFET的线性模式工作和热不稳定性，同时应用SOA温度降额方法来设计更稳定可靠的电路 |

# 1. 导言

功率MOSFET因其超低的$R_{DSon}$和传导损耗被广泛地用作开关器件。但在很多应用中，MOSFET被应用在其饱和状态，某些情况要求同一器件在这两种模式中保持良好的稳定性和性能。本应用笔记旨在从理论角度描述线性模式工作的主要特性。而且本文也将讨论高温情况下SOA（安全工作区域）降额和脉冲波形转换情况下应用的主题，同时还在相关段落中提供原理图示例。

# 2. 线性模式定义

在线性模式下，MOSFET在饱和状态或饱和区域中工作，它表现为栅极电压控制的电流源。与完全导通（或完全增强）的情况相反，MOSFET在线性模式下的漏极-源极阻抗相对较高，因而功耗也比较高。在线性模式下，功率等于漏极电流与漏极-源极电压的乘积($I_D \times V_{DS}$)，两者数值都比较高。

线性模态可以用下面的方程组来解析。MOSFET必须处于导通状态（公式1），并且$V_{DS}$大于过驱动电压($V_{OD}$)（公式2）。如果满足上述两个条件，漏极电流将与$V_{OD}$的平方（也就是施加的$V_{GS}$）成正比，如公式3所示，其中的*k*是一个技术参数，和所使用的Trench技术类型相关。

$$V_{GS} > V_{GS(th)} \tag{1}$$

$$V_{DS} > V_{GS} - V_{GS(th)} = V_{OD} \tag{2}$$

$$I_D = k \cdot (V_{GS} - V_{GS(th)})^2 \tag{3}$$

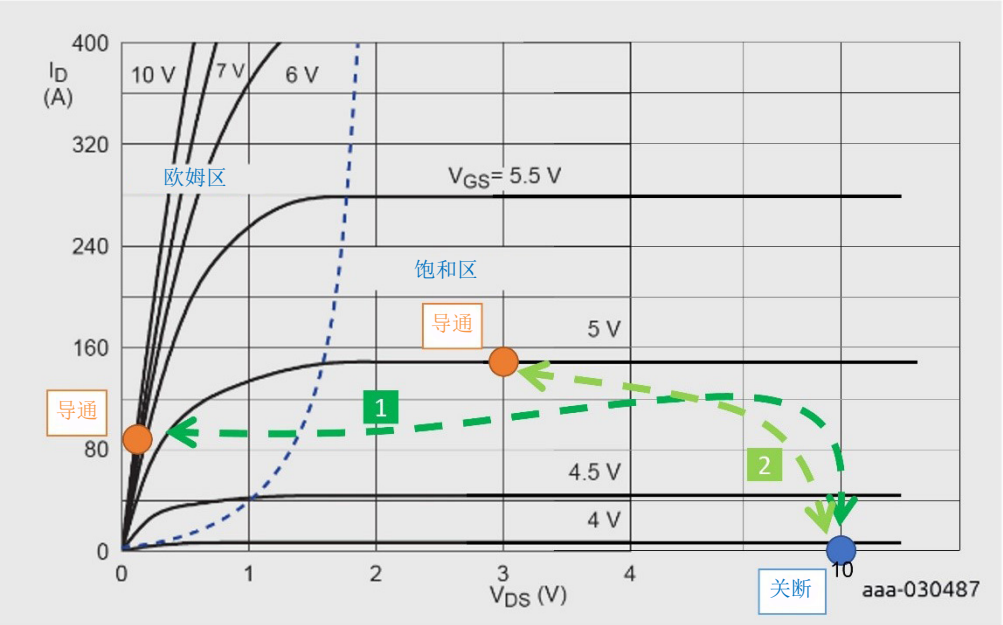
MOSFET的输出特性（图1）描述了$I_D$随$V_{DS}$和$V_{GS}$的变化：

- 对于低$V_{DS}$和大约7 V~10 V的$V_{GS}$，电流和电压之间为线性关系。MOSFET在线性区域（或欧姆区）中工作，它的行为就像一个电阻（完全导通）。在这种情况下，功耗比较低，计算方式为$I_D^2 \times R_{DSon}$。
- 对于较高的$V_{DS}$和给定的$V_{GS}$，$I_D$相当恒定。在饱和区中，随着$V_{GS}$增大，电流也会增大。在这种情况下，功耗比较高，计算方式为$V_{DS} \times I_D$。

MOSFET在线性模式下有两种工作方式：间接地，持续时间短，是由于开关动作导致的；或者是直接地，持续时间较长。事实上，每次当MOSFET导通和关断时，都会伴随着线性模式。参考图1，在导通过程中，MOSFET的工作点从高$V_{DS}$和零$I_D$（关断状态）移动至低$V_{DS}$和高$I_D$。如果最终目标是使用MOSFET作为开关，那么尝试通过缩短开关时间来减少在线性模式下的时间和功耗，通常是很好的做法。相反，某些应用要求MOSFET有意在线性模式下工作（曲线2）。在这种情况下，我们建议：

- 在给定的脉冲持续时间和贴装基底温度($T_{mb}$)下，保证器件在SOA曲线内运行。
- 采用合适的散热管理技术。


本文档中提供的所有信息均受法律免责声明的限制。
© Nexperia B.V. 2022年。保留所有权利




[1] $R_{DSon}$工作模式导通/关断轨迹；[2] 线性模式工作导通/关断轨迹

**图1. MOSFET输出特性示例：导通/关断轨迹**

# 3. 典型线性模式应用示例

## 3.1. 安全气囊应用

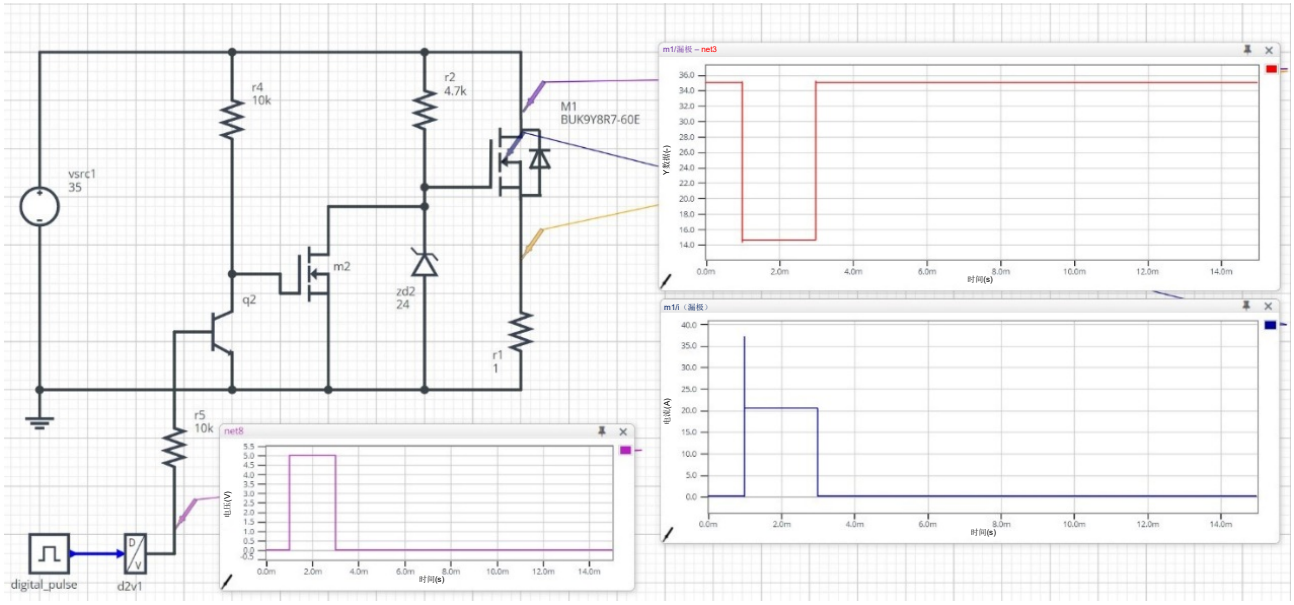



**图2. 安全气囊应用原理图和波形**


本文档中提供的所有信息均受法律免责声明的限制。

© Nexperia B.V. 2022年。保留所有权利

## 3.2. 有源钳位

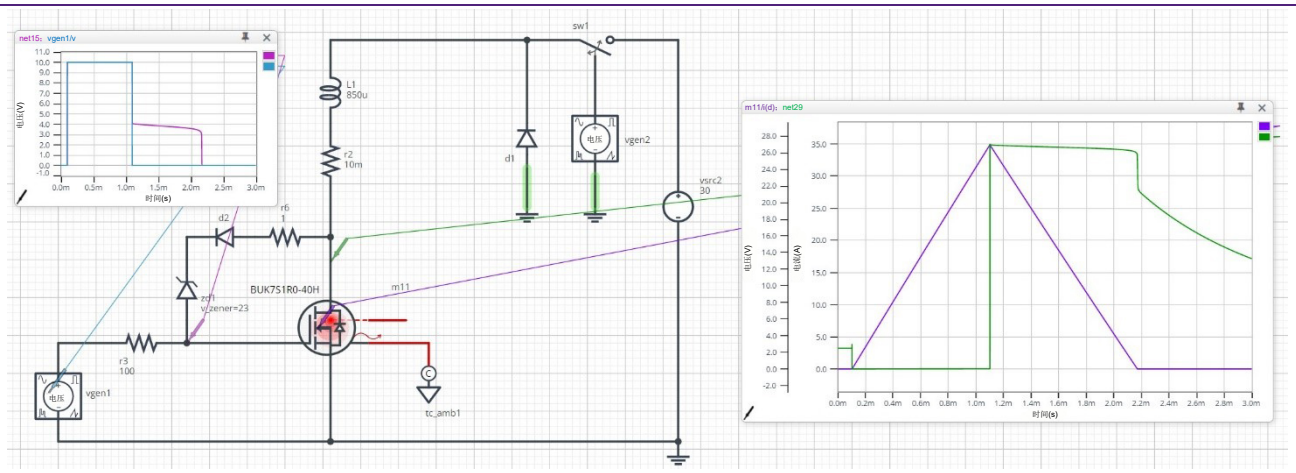



图3. 有源钳位原理图和波形

## 3.3. 电容器预充电（软启动/热插拔）

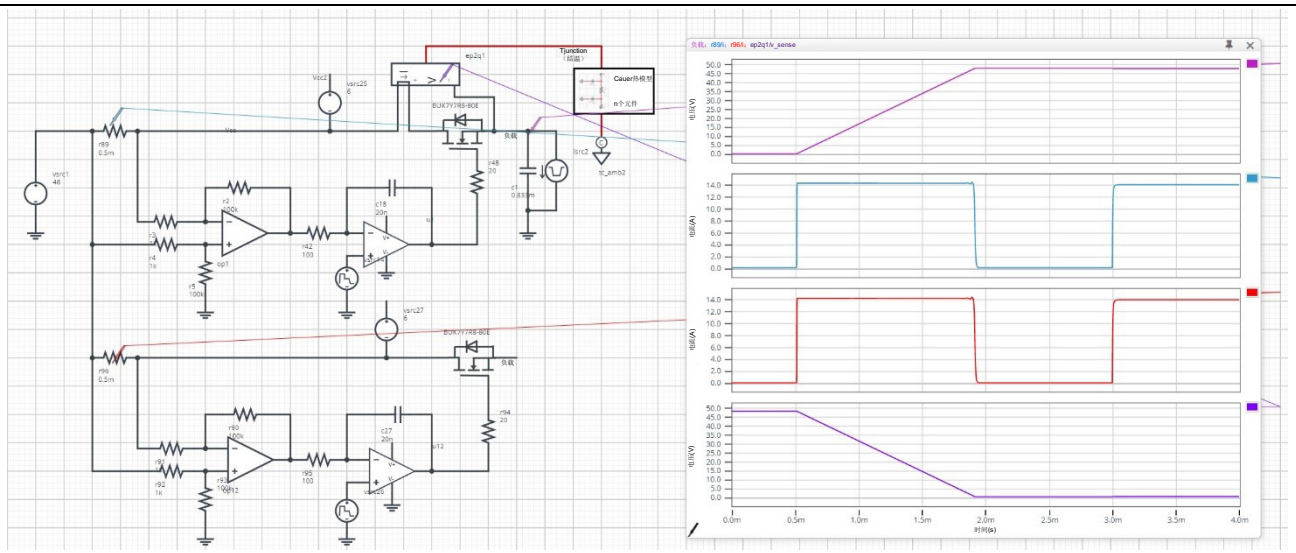


图4. 软启动原理图和波形


本文档中提供的所有信息均受法律免责声明的限制。

© Nexperia B.V. 2022年。保留所有权利

### 3.4. LDO（低压差）线性稳压器

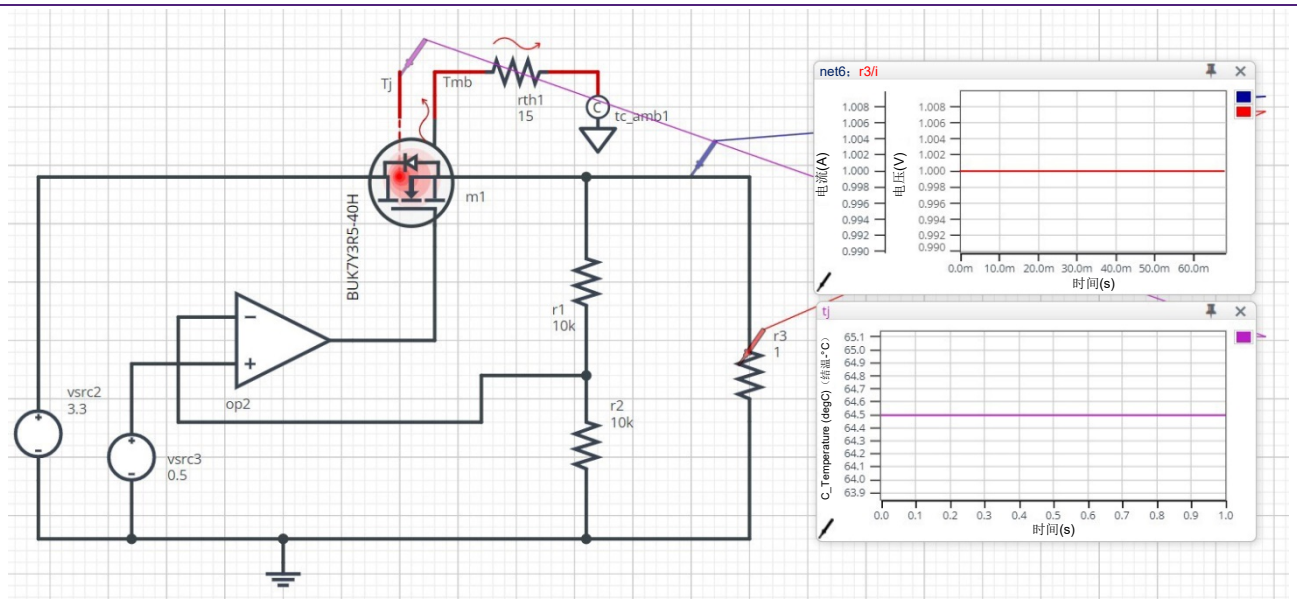
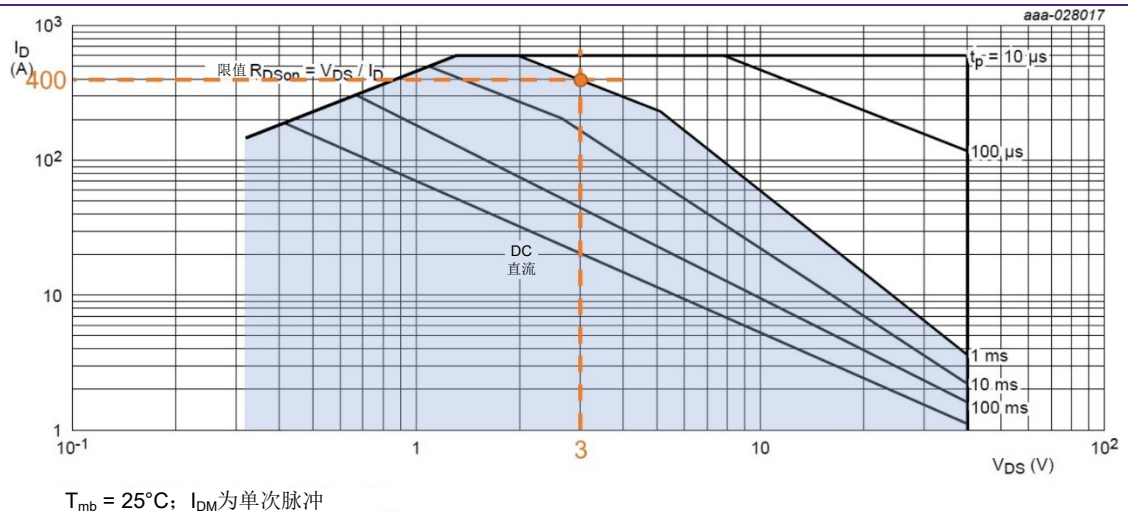



图5. LDO原理图和波形

## 4. SOA曲线

安全工作区(SOA)曲线显示了器件在出现故障之前能够安全处理的功率。该图显示了漏极电流与漏极-源极电压的关系。这个限制取决于功率的持续时间，以及MOSFET的工作区域。该图仅对25˚C的恒定安装基底温度和单脉冲或直流操作有效。SOA在线性模式工作下尤其有用。图6显示了在脉冲宽度为1 ms的条件下，MOSFET能够安全可靠地工作的区域，限值为$V_{DS}$ = 3 V，脉冲宽度为1 ms。




$T_{mb}$ = 25°C；$I_{DM}$为单次脉冲

图6. SOA：$V_{DS}$ = 3 V、脉冲宽度为1 ms条件下的1 ms最大电流限值

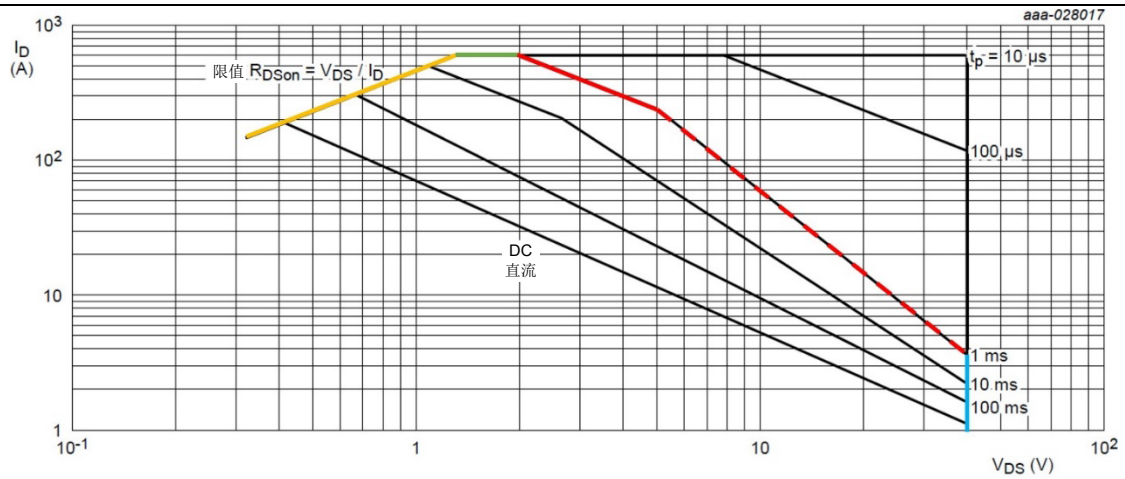

本文档中提供的所有信息均受法律免责声明的限制。

© Nexperia B.V. 2022年。保留所有权利

图7显示了如何根据MOSFET的工作区域来细分SOA曲线（假定为1 ms的时间脉冲）。黄线表示$R_{DSon}$模式下的限值，绿线表示封装带来的限值，蓝线表示雪崩带来的限值（在发生雪崩之前，处于最高额定电压下）。有关SOA限值的更深入描述，请参见AN11158：*了解功率MOSFET数据手册中的参数*（第*3.1*节*"安全工作区(SOA)曲线"*）。

红线显示在线性模式工作过程中的限值。此限值经过实验的验证，在实验中保持$V_{DS}$恒定，同时让脉冲电流持续特定时间。如公式4所示，它取决于MOSFET ($Z_{th}$)的热阻抗、最大结温($T_{j(max)}$ = 175˚C)和安装基底温度($T_{mb}$)。

$$P = I_D \cdot V_{DS} = \frac{T_{j(max)} - T_{mb}}{Z_{th}} \quad (4)$$




$T_{mb}$ = 25°C；$I_{DM}$为单次脉冲

**图7. SOA曲线；曲线限值**

根据公式4，随着脉冲时间减少，限值会提高（可承受更高功耗），因为在脉冲时间较短的情况下，$Z_{th}$降低（参见图8）。最后，红色虚线表示Spirito区域，在该区域中将出现热不稳定性，在第5.1节中，我们将对此主题进行更详细讨论。

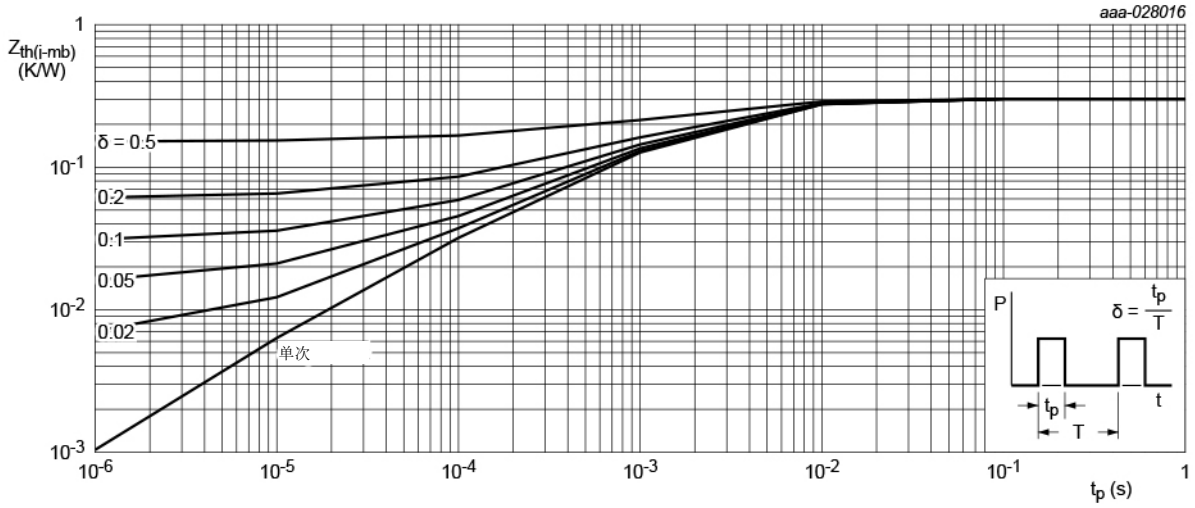



**图8. 结至安装基底的瞬态热阻与脉冲持续时间的函数关系**


本文档中提供的所有信息均受法律免责声明的限制。

© Nexperia B.V. 2022年。保留所有权利

# 5. 温度依赖性

## 5.1. 热不稳定性

对于固定的$V_{DS}$，我们在转移特性图中显示了漏极电流随栅极偏置电压的变化，如图9所示。该图使用两条线显示在25˚C（实线）和175˚C（虚线）的结温下的MOSFET工作情况。对于足够低的$V_{GS}$，由于阈值电压($V_{GSth}$)的负温度系数，MOSFET在175˚C结温下工作时可驱动的电流多于在25˚C时，如图10所示。在这种情况下，MOSFET在热不稳定性区域中工作，这是由电流的正温度系数决定的。即便考虑硅芯片上的单个点，也同样如此。

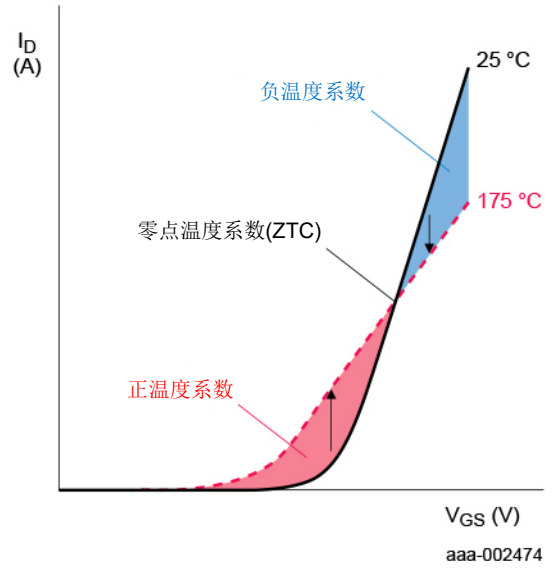
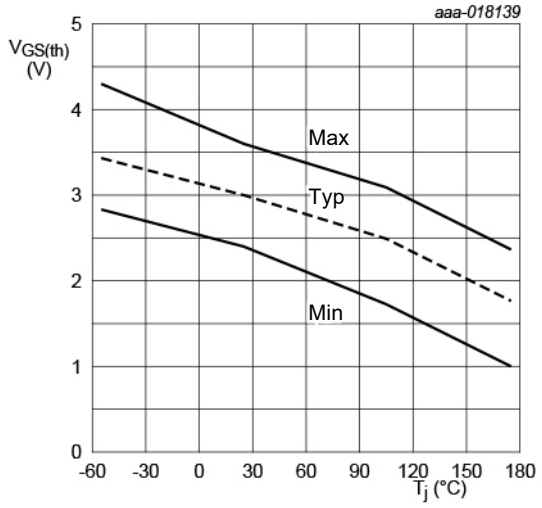



图9. 转移特性，显示了正温度系数和负温度系数区域

但是，这种现象可以避免。事实上，对于特定的$V_{DS}$，存在一个临界电流，在高于这个电流的情况下，会出现负反馈，从而导致热稳定性。这个临界电流称为零点温度系数(ZTC)点。



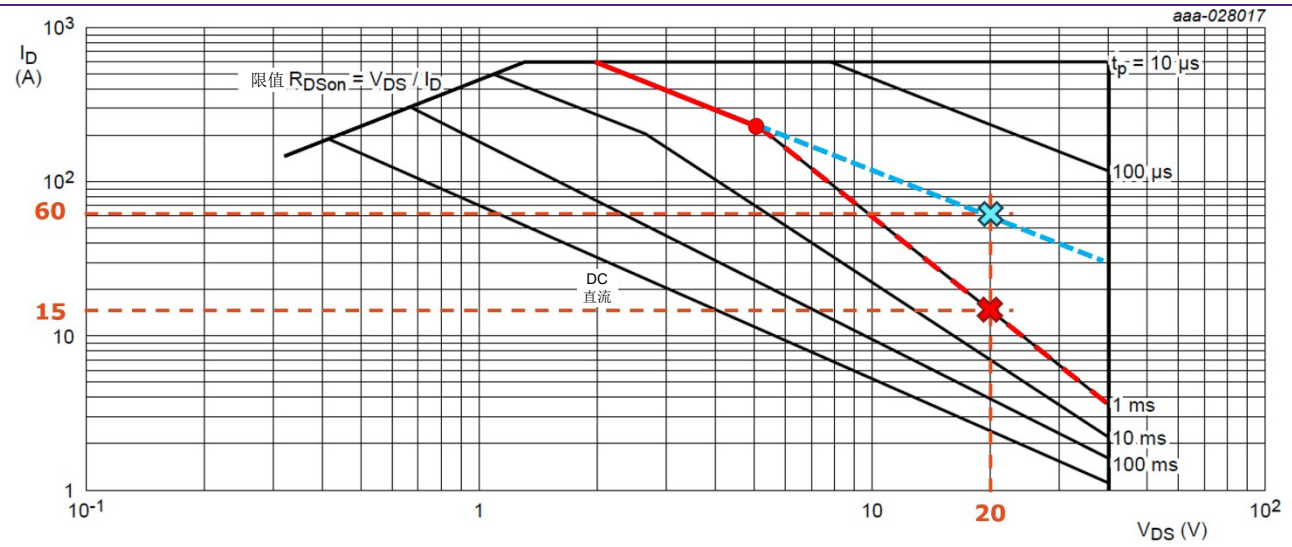

$I_D$ = 1 mA; $V_{DS}$ = $V_{GS}$

图10. 栅极-源极阈值电压与结温的函数关系


本文档中提供的所有信息均受法律免责声明的限制。

© Nexperia B.V. 2022年。保留所有权利

在SOA曲线上，两条斜率不同的功率线与其相交的拐点显示了热不稳定性，如图11所示（对于1 ms脉冲，拐点位于5 V的位置）。理论限值以蓝色虚线表示，可以使用公式4计算，其中$Z_{th} = Z_{th(j-mb)}$。此限值可以使用RC热模型来确定，例如图12显示的Cauer模型。红色虚线表示器件的实际性能。在这种情况下，$Z_{th} \neq Z_{th(j-mb)}$，因此限值不能使用电气模型来确定。性能降低可能非常严重：在这种情况下，$V_{DS}$为20 V，MOSFET能够处理的最大电流从理论上的60 A降低至15 A左右（降低75%）。这种现象也称为Spirito效应，它是由于硅芯片上的电流分布不均匀导致的[1]。在ZTC点的下方，如果某个小区域的温度高于芯片其他部分，它将消耗更多电流，产生更高功耗，因而变得更热。这个过程最终导致热失控，MOSFET因为三端短路而损坏。在芯片中心附近和接近晶圆焊接结构的位置，将出现烧灼痕迹，正如"AN11243：*功率MOSFET上的电气过压的故障特征*"（*第1.3节 线性模式工作*）*所述*。




$T_{mb}$ = 25°C；$I_{DM}$为单次脉冲

**图11. SOA曲线：Spirito效应**

此外，我们还观察到，这些热点在更宽的功率脉冲范围内出现更加频繁。请参考图11，对于10 ms时间脉冲，Spirito效应发生在较低$V_{DS}$（大约3 V）的位置，对于1 ms脉冲，则发生在$V_{DS}$(5 V)的位置，而任何电压下的直流工作都受到热不稳定性的限制。

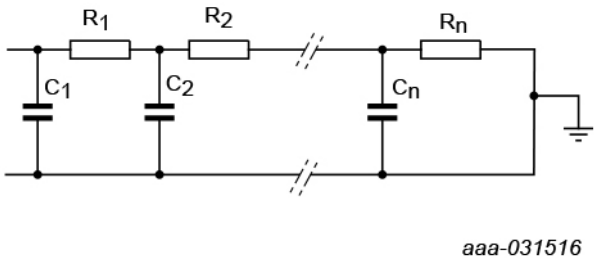
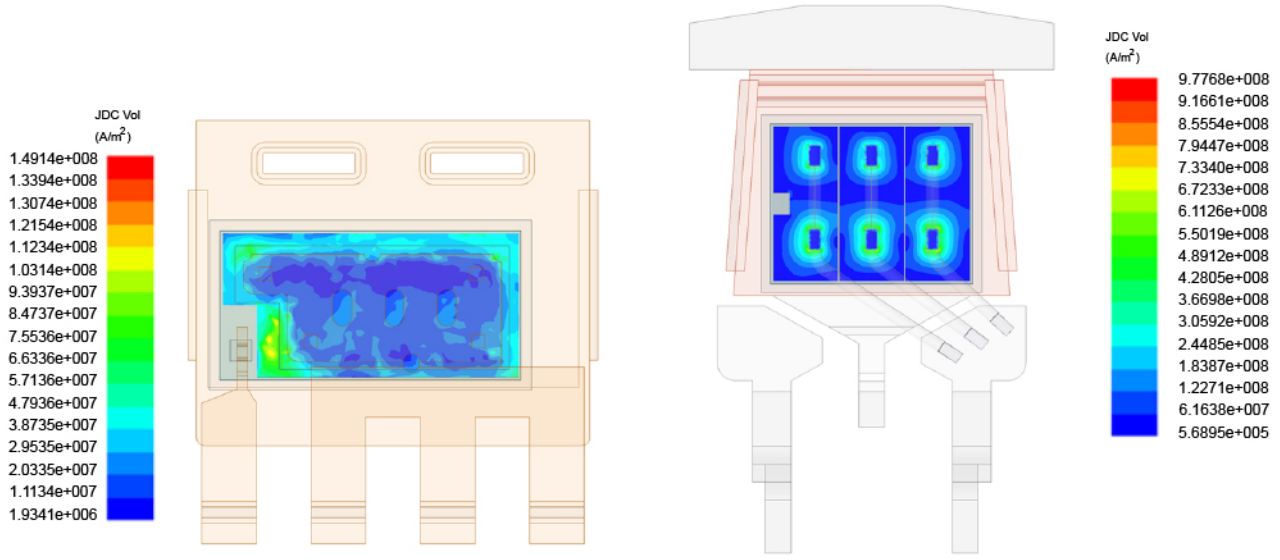



**图12. Cauer RC热模型**

电流在硅芯片上分布不均匀，受到多个因素的影响，包括MOSFET单元的均匀性、芯片连接的完整性和均匀性。除此之外，晶圆焊接技术的类型也会产生很大影响。如图13所示，焊线会增加芯片上的小点中的电流密度，可能会让它们变成热点。另一方面，LFPAK的铜夹片可以防止局部电流拥挤，从而降低形成热点的可能性。

1 低压功率MOS的电热不稳定性：实验表征 - IEEE；G. Breglio、F. Frisina、A. Magri、P. Spirito


本文档中提供的所有信息均受法律免责声明的限制。
© Nexperia B.V. 2022年。保留所有权利




a) LFPAK88　　b) D2PAK

注意：LFPAK88和D2PAK的电流密度等值线标度不同，参见随附的颜色标度

**图13. a）LFPAK88和b）D2PAK封装的电流分布等值线**

此外，单元密度也会影响SOA的形状。由于单元间距较宽，单元密度较低，因而老式Trench（或Planar）技术展现出较高的$R_{DSon}$。对于给定的漏极电流，老式技术中的单元更可能在高于ZTC点的范围工作，由于每单元电流能力较高，因而工作具有热稳定性。因此，对于给定的芯片尺寸，老式Trench（或Planar）技术展现出较高的$R_{DSon}$，但在线性模式下性能更好。

新式Trench结构采用创新技术，在其他一些方面显著提升了性能，例如在开关、雪崩和稳态性能方面。但是，新技术的线性模式功能通常较差，需要满足比较严格的要求时，设计人员可以有以下两种选择（在热设计无法改进的情况下）：使用较低的$R_{th(j-mb)}$（芯片更大）和较大的封装、采用旧式技术（单元密度较低）的MOSFET；或者使用来自Nexperia增强SOA功能的ASFET产品组合MOSFET。

## 5.2. 高温SOA降额

Nexperia的数据手册中的SOA曲线仅对25˚C的安装基底温度有效。如果安装基底温度不同，SOA曲线必须考虑降额，因为在其他温度下的功能特性一般没有直接标示。在这种情况下，我们可以通过方法来查找新限值的准确或近似值，这要取决于器件的工作区域。

有三种主要降额方法，具体取决于哪个数值进行了缩放或保持恒定。如果电流进行了缩放，则电压保持恒定，反之亦然，如果电压进行了缩放，则电流保持恒定。第三个选项是对电压和电流都进行缩放，从而保持功率恒定。这些方法通过相同的方式，对$R_{DSon}$、封装、击穿和线性模式限值进行预测。唯一的差异是如何近似计算Spirito区域，也就是拐点的位置。对于选定的$V_{DS}$，电流缩放方法可以得到最高的限值，而电压缩放方法得到最低的限值。通常，与测量的热SOA比较，我们发现每种方法都会低估器件的真实性能，这就提供了一定的安全裕量，更好地避免热不稳定性。如图14所示，电流缩放方法通常提供最佳的Spirito近似值。表1总结了使用三种方法和测量来预测的电流限值，$V_{DS}$ = 30 V，$T_{mb}$ = 125˚C，脉冲宽度为1 ms。


本文档中提供的所有信息均受法律免责声明的限制。
© Nexperia B.V. 2022年。保留所有权利

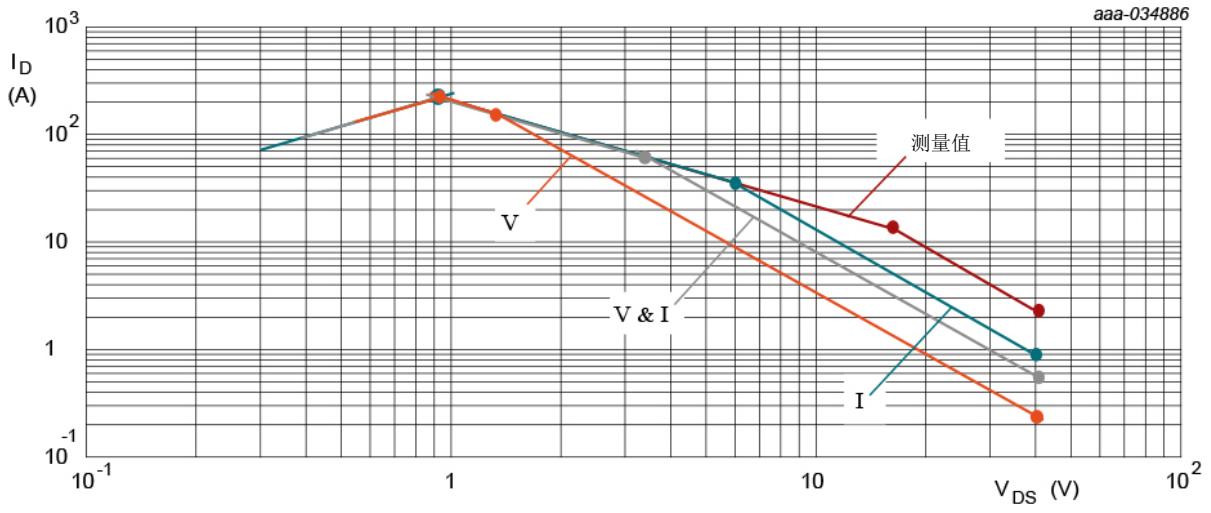



图14. BUK7Y2R0-40H的SOA降额方法与测量的对比实例

表1. 缩放方法与测量数据的对比

| $I_D$限值：$V_{DS}$ = 30 V；$T_{mb}$ = 125˚C；脉冲宽度 = 1 ms | | | |
|---|---|---|---|
| 测量值 | 电流缩放 | 电压缩放 | 功率缩放 |
| 4 A | 1.5 A | 1 A | 0.4 A |

在应用这些方法之前，必须计算功率缩放系数($k_{PSF}$)。可以通过查看图15中的图形来获取该系数，或者使用公式5进行计算。此图表在Nexperia的数据手册中提供，代表标准化功耗，与安装基底温度的函数关系。由于双重缩放，功率缩放方法使用了不同的系数，使用公式6进行计算。

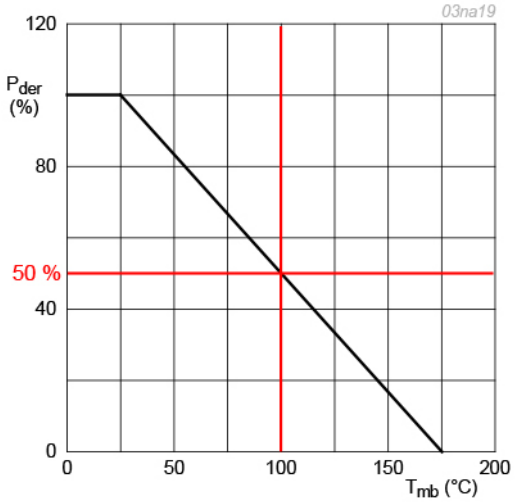



图15. 标准化总功耗与安装基底温度的函数关系：功率缩放系数

$$k_{PSF} = \frac{175\ °C - T_{mb}}{175\ °C - 25\ °C} \quad (5)$$

$$k_{PSF,\ pwr} = \sqrt{k_{PSF}} = \sqrt{\frac{175\ °C - T_{mb}}{175\ °C - 25\ °C}} \quad (6)$$


本文档中提供的所有信息均受法律免责声明的限制。

© Nexperia B.V. 2022年。保留所有权利

例如，MOSFET的电流限值是使用电流缩放方法计算的，$T_{mb}$ = 100˚C，$V_{DS}$ = 3 V，脉冲宽度为1 ms：

1. 在$T_{mb}$ = 25˚C条件下的电流限值为400 A，如图16所示。
2. $k_{PSF}$使用公式5进行计算，精确值为0.5（即50%）。
3. 在$T_{mb}$ = 100˚C条件下的新限值为200 A，使用公式7计算。

$$I_{D,limit}(@100\ °C) = k_{PSF} \cdot I_{D,limit}(@25\ °C) \quad (7)$$

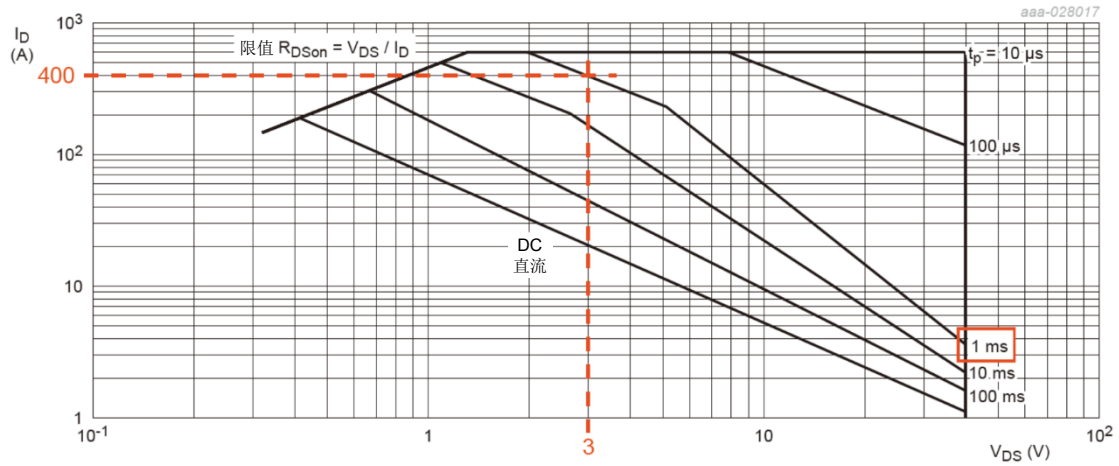



图16. 数据手册SOA：在$T_{mb}$ = 25˚C条件下的电流限值

完整的热SOA图表可以使用以下步骤绘制（使用电流缩放方法，它也可以适应其他方法）：

- $R_{DSon}$限值线不降额，因为它是使用175˚C条件下的$R_{DSon}$计算的。
- 线性模式拐点和击穿限值下移，使用功率缩放系数（在此情况下，该系数为0.5）来计算新的电流限值。当电流为原始电流一半时，产生Spirito区域的新拐点。
- 最后，线条可以使用相同的坡度，延伸到端点。

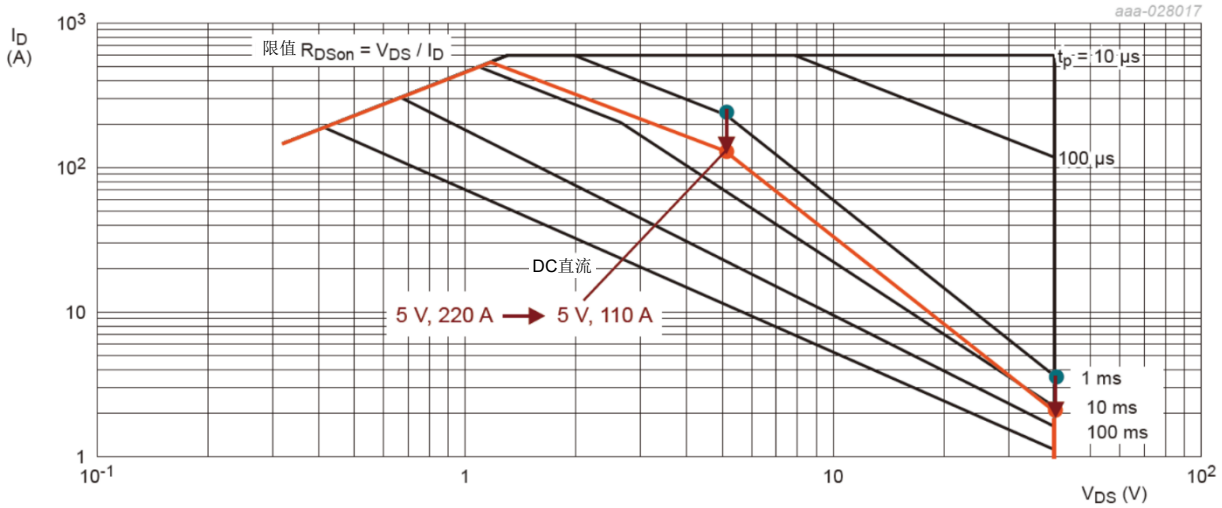



图17. 在$T_{mb}$ = 100˚C、脉冲宽度为1 ms条件下，使用电流缩放方法计算的降额SOA限值


本文档中提供的所有信息均受法律免责声明的限制。
© Nexperia B.V. 2022年。保留所有权利

## 6. SOA：脉冲波形转换

在某些应用中，功率可能不是矩形脉冲，或者持续时间与SOA图形中提供的值不同。在这两种情况下，可以执行功率形状转换，并且在经过验证的SOA内工作。如果MOSFET在欧姆模式或线性模式下工作，这种转换是准确的。但是，如果在Spirito区域中工作，这种转换可能不准确。

如果MOSFET不在Spirito区域中工作，可以通过调节持续时间或峰值，将脉冲转换为具有相同能量的矩形脉冲。图18显示了三角形功率脉冲的转换。如果SOA图形没有提供该脉冲的脉冲持续时间，可以使用数据手册（或RC热模型）中的热阻抗值和公式4来计算限值。我们始终推荐使用热模型和电热模型来精确地预测结温。

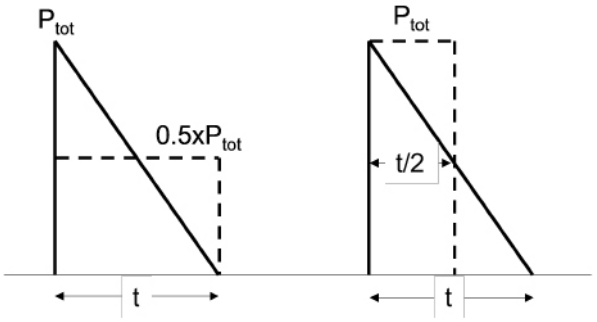



**图18. MOSFET在Spirito区域外工作时，三角形脉冲的功率波形转换**

如果器件在Spirito区域内工作，则脉冲无法通过热阻抗的方式进行转换。在这种情况下，使用热模型和电热模型只能得到平均结温，它不反映热点的温度。一种保守的方法是考虑一个与原始脉冲峰值和持续时间相同的矩形脉冲。但是，根据我们的经验，建议将三角形脉冲转换为具有相同持续时间但峰值仅为一半的矩形脉冲。我们已经使用BUK7S1R0-40H进行了测试，有源钳位电路如图19所示。值得注意的是，这些结果应视为仅对特定器件有效。


本文档中提供的所有信息均受法律免责声明的限制。
© Nexperia B.V. 2022年。保留所有权利

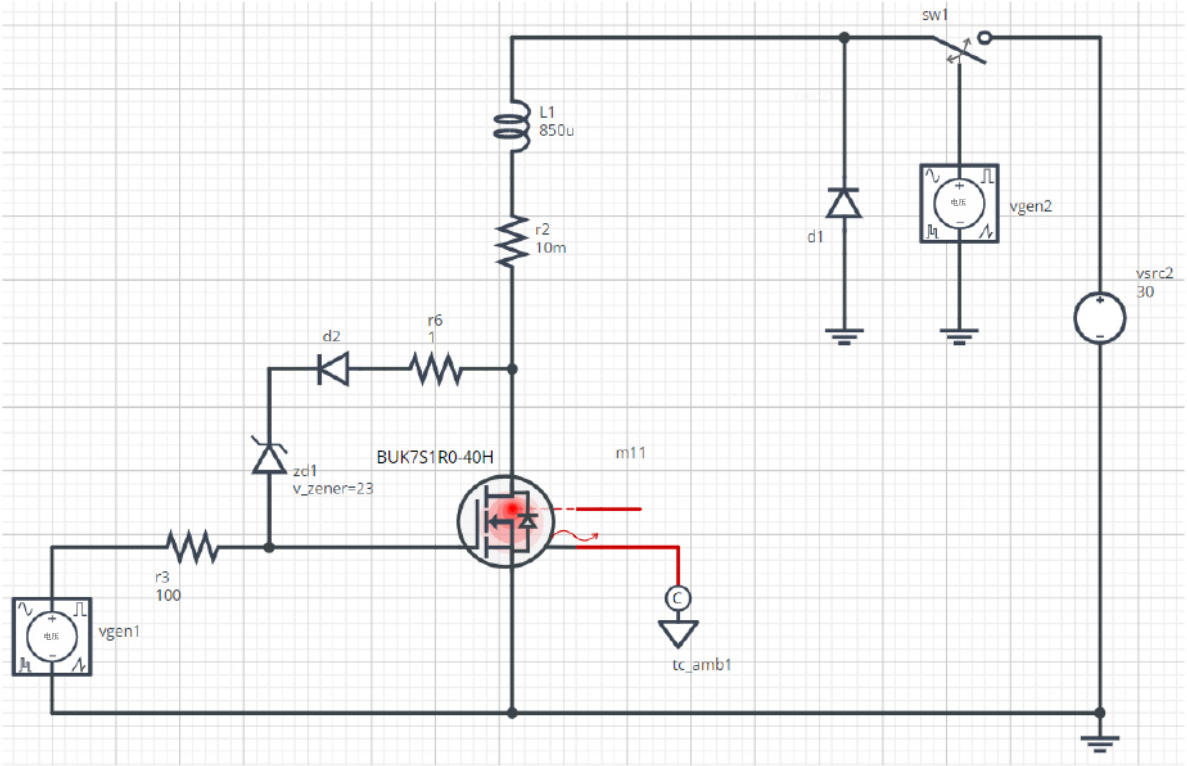



图19. 使用BUK7S1R0-40H的有源钳位电路

有源钳位在感性开关中使用，类似于雪崩，但器件在线性模式下工作，钳位电压比在雪崩中更低。当开关sw1位于关断位置，MOSFET M1处于导通状态时，电流可以通过主电路。一旦电感“已充电”，MOSFET将会关断。贮存在电感中的能量会产生高电压，击穿齐纳二极管ZD1。这样栅极电压会被钳位，导通MOSFET，使其MOSFET吸收电感释放的能量。在最后一次激活过程中，MOSFET在线性模式下工作，其漏极电流逐渐降低但$V_{DS}$相当恒定，如图20（仿真）所示。因此，这样会形成三角形脉冲，持续1 ms。

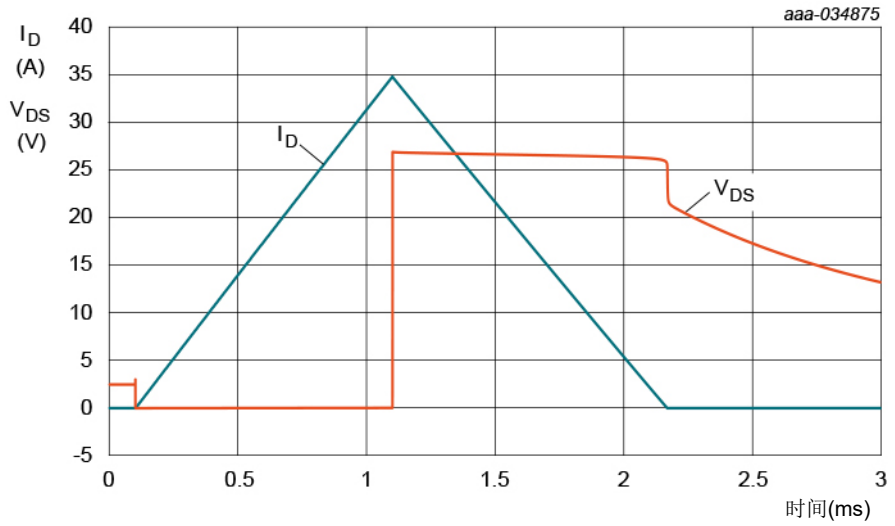
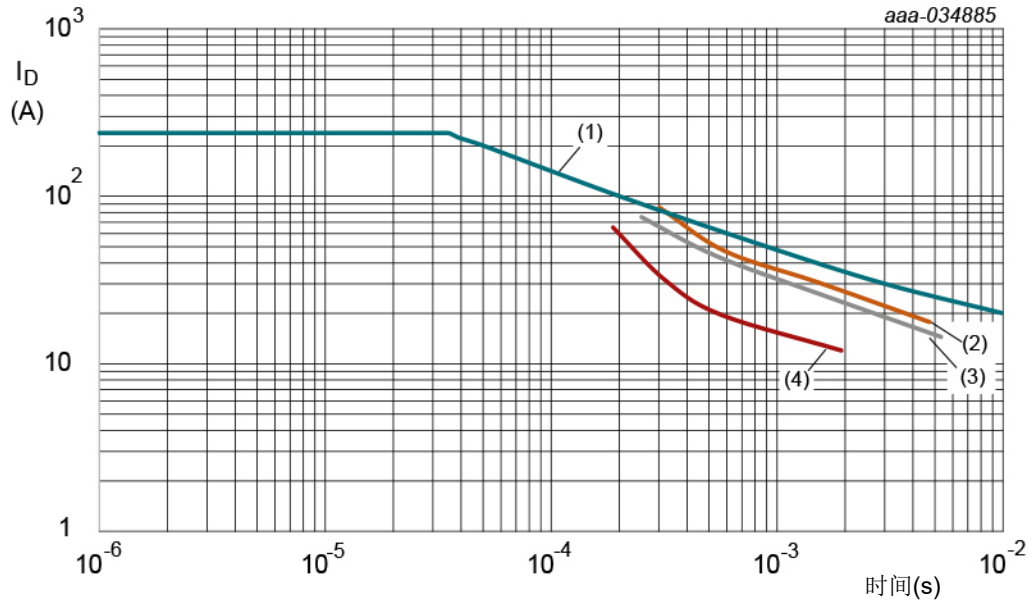



图20. MOSFET在有源钳位过程中的$V_{DS}$和$I_D$

该电路用于在$V_{DS}$为20 V、22 V和28 V的情况下，对BUK7S1R0-40H进行测试。该限值是通过使用数据手册中SOA的相同方法，降额发生损坏的电流来获取的。图21显示了不同钳位电压下的电流能力和雪崩时间($I_{AL}$)的关系。表2总结了使用1 m脉冲时的图形结果。图中显示，三角形脉冲的电流能力为矩形脉冲的2倍左右。随着电压提高，电流会降低，与预测的矩形脉冲的情况相同。


本文档中提供的所有信息均受法律免责声明的限制。

© Nexperia B.V. 2022年。保留所有权利




(1) $I_{AL}$；(2) $V_{CL}$ = 20 V；(3) $V_{CL}$ = 22 V；(4) $V_{CL}$ = 28 V

**图21. BUK7S1R0-40H的电流能力与雪崩时间的关系，以及它在有源钳位过程中的电流能力**

**表2. BUK7S1R0-40H：三角形和矩形脉冲能力**

| 电压(V) | 1 ms有源钳位<br>电流(A) | 1 ms SOA（数据手册）<br>电流(A) |
|---|---|---|
| 20 | 35 | 16 |
| 22 | 31 | 14 |
| 28 | 15 | 8 |

相同的原理也适用于电容预充电，此时MOSFET会产生三角形脉冲。但在此情况下，$I_D$是恒定的，$V_{DS}$降低。由于电压降低，导致工作点向SOA图形左侧移动，远离Spirito区域，对于有源钳位而言，出现热不稳定性的风险较低。

## 7. 结论

在本应用笔记中，我们提供了MOSFET线性模式工作的概述。在简短的理论介绍之后，重点强调线性模式与$R_{DSon}$模式的主要差异，并描述了线性模式与SOA之间的关系。其中包括热不稳定性（Spirito区域）、高温SOA降额方法和脉冲波形转换。

## 8. 修订记录

**表3. 修订记录**

| 修订编号 | 日期 | 描述 |
|---|---|---|
| 2.0 | 2022/4/12 | 第5.1节中的文本更新。 |
| 1.0 | 2022/4/1 | 初始版本。 |


本文档中提供的所有信息均受法律免责声明的限制。
© Nexperia B.V. 2022年。保留所有权利

# 9. 法律信息

## 定义

**初稿** — 本文仅为初稿版本。内容仍在内部审查，尚未正式批准，可能会有进一步修改或补充。Nexperia对此处所含信息的准确性或完整性不做任何说明或保证，并对因使用此信息而带来的后果不承担任何责任。

## 免责声明

**有限保证和责任** — 本文档中的信息据信是准确和可靠的。但是，Nexperia对此处所含信息的准确性或完整性不做任何明示或暗示的声明或保证，并对因使用此信息而带来的后果不承担任何责任。若文中信息并非来自Nexperia，则Nexperia对该信息的内容概不负责。

在任何情况下，对于任何间接性、意外性、惩罚性、特殊性或后果性损害（包括但不限于利润损失、积蓄损失、业务中断、因拆卸或更换任何产品而产生的开支或返工费用），无论此等损害是否基于侵权行为（包括过失）、保证、违约或任何其他法理，Nexperia均不承担任何责任。

对于因任何原因给客户带来的任何损害，Nexperia对本文所述产品的总计责任和累积责任仅限于Nexperia商业销售条款和条件所规定的范围。

**修改权** — Nexperia有权随时修改本文档所发布的信息，包括但不限于规格和产品描述，恕不另行通知。本文档将取代并替换之前就此提供的所有信息。

**适用性** — Nexperia产品并非设计、授权或担保适合用于生命维持、生命攸关或安全关键型系统或设备，亦非设计、授权或担保适合用于在Nexperia产品失效或故障时可导致人员受伤、死亡或严重财产损失或环境损害的应用。Nxperia及其供应商对在此类设备或应用中加入和/或使用Nexperia产品不承担任何责任，客户需自行承担因加入和/或使用Nexperia产品而带来的风险。

**应用** — 本文档所载任何产品的应用只用于例证目的。此类应用若未进一步测试或修改用于特定用途，Nexperia对其适用性不做任何声明或保证。

客户负责自行使用Nexperia产品进行设计和应用，对于应用或客户产品设计，Nexperia均无义务提供任何协助。客户须自行负责检验Nexperia的产品是否适用于客户的规划应用和产品，以及是否适用于其第三方客户的规划应用和使用。客户应提供适当的设计和操作安全保障措施，以最大限度降低与应用和产品相关的风险。

对于因客户的应用或产品的任何缺陷或故障，或者客户的第三方客户的应用或使用导致的任何故障、损害、费用或问题，Nexperia均不承担任何责任。客户负责对使用Nexperia产品的应用和产品执行所有必要的测试，以避免这些应用和产品或者客户的第三方客户的应用或使用存在任何缺陷。Nexperia不承担与此相关的任何责任。

**出口管制** — 本文档以及此处所描述的产品可能受出口法规的管制。出口可能需要事先经主管部门批准。

**翻译** — 非英文（翻译）版文档仅供参考。如果翻译版与英文版之间存在任何差异，以英文版为准。

## 商标

注意：所有引用的品牌、产品名称、服务名称以及商标均为其各自所有者的资产。


本文档中提供的所有信息均受法律免责声明的限制。

© Nexperia B.V. 2022年。保留所有权利

# 表目录

表1. 缩放方法与测量数据的对比.....10
表2. BUK7S1R0-40H：三角形和矩形脉冲能力 .....14
表3. 修订记录 .....14


本文档中提供的所有信息均受法律免责声明的限制。

© Nexperia B.V. 2022年。保留所有权利

# 图目录

图1. MOSFET输出特性示例：导通/关断轨迹 ..... 3
图2. 安全气囊应用原理图和波形..... 3
图3. 有源钳位原理图和波形..... 4
图4. 软启动原理图和波形 ..... 4
图5. LDO原理图和波形..... 5
图6. SOA：$V_{DS}$ = 3 V、脉冲宽度为1 ms条件下的
1 ms最大电流限值..... 5
图7. SOA曲线；曲线限值..... 6
图8. 结至安装基底的瞬态热阻与脉冲持续时间的函数关系；
典型值 ..... 6
图9. 转移特性，显示了正温度系数和负温度系数区域..... 7
图10. 栅极-源极阈值电压与结温的函数关系 ..... 7
图11. SOA曲线：Spirito效应..... 8
图12. Cauer RC热模型..... 8
图13. a）LFPAK88和b）D2PAK封装的电流分布等值线 ..... 9
图14. BUK7Y2R0-40H的SOA降额方法与测量的对比实例.....10
图15. 标准化总功耗与安装基底温度的函数关系：
功率缩放系数.....10
图16. 数据手册SOA：在$T_{mb}$ = 25˚C条件下的电流限值.....11
图17. 在$T_{mb}$ = 100˚C、脉冲宽度为1 ms条件下，
使用电流缩放方法计算的降额SOA限值 .....11
图18. MOSFET在Spirito区域外工作时，
三角形脉冲的功率波形转换 .....12
图19. 使用BUK7S1R0-40H的有源钳位电路 .....13
图20. MOSFET在有源钳位过程中的$V_{DS}$和$I_D$.....13
图21. BUK7S1R0-40H的电流能力与雪崩时间的关系，
以及它在有源钳位过程中的电流能力.....14


本文档中提供的所有信息均受法律免责声明的限制。
© Nexperia B.V. 2022年。保留所有权利

# 目录

**1. 导言 ..... 2**
**2. 线性模式定义 ..... 2**
**3. 典型线性模式应用示例 ..... 3**
3.1. 安全气囊应用 ..... 3
3.2. 有源钳位 ..... 4
3.3. 电容器预充电（软启动/热插拔） ..... 4
3.4. LDO（低压差）线性稳压器 ..... 5
**4. SOA曲线 ..... 5**
**5. 温度依赖性 ..... 7**
5.1. 热不稳定性 ..... 7
5.2. 高温SOA降额 ..... 9
**6. SOA：脉冲波形转换 ..... 12**
**7. 结论 ..... 14**
**8. 修订记录 ..... 14**
**9. 法律信息 ..... 15**

**© Nexperia B.V. 2022年。保留所有权利**

更多详情，请访问：http://www.nexperia.com
如需获取销售办事处地址，请发送电子邮件至：salesaddresses@nexperia.com
**发布日期：2022年4月12日**